

DOI: 10.7667/PSPC152128

基于搜索+调整的两阶段萤火虫算法求解机组组合问题

方必武, 王波, 刘涤尘, 罗金号, 马恒瑞, 陈思远

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种新颖的基于搜索+调整的两阶段萤火虫算法求解机组组合问题。算法将机组组合求解流程分解为具有离散变量和连续变量的两个优化问题, 通过二进制编码的萤火虫算法求解含离散变量的机组启停主问题, 利用改进的实数编码萤火虫算法解决连续变量的负荷经济分配子问题, 采用调整策略校核和修复约束, 实现主子问题的交替迭代求解。算法通过启发式的约束调整策略, 以及两种编码方式实现了离散变量和连续变量的分解优化, 提高了机组组合问题求解的效率和精度。通过对6个不同规模算例的计算及与其他经典算法的对比, 验证了所提算法的有效性和优越性。

关键词: 两阶段萤火虫算法; 机组组合; 启发式约束调整

A two-stage firefly algorithm based on search + adjustment for solving unit commitment problem

FANG Biwu, WANG Bo, LIU Dichen, LUO Jinhao, MA Hengrui, CHEN Siyuan

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper proposes a novel two-stage firefly algorithm based on search + adjustment for solving unit commitment problem. The solving process of UC will be broken down into two optimization problems with discrete and continuous variables respectively. The main discrete problem to determine the off/on status is solved by binary encoding firefly algorithm, the continuous sub-problem of economic load variables assignment is solved by improved real-coded firefly algorithm, and check and repair constraints are used to achieve alternative and iterative calculation. Heuristic constraints adjustment, as well as two-stage coding approach is used to achieve the decompose optimization of discrete and continuous variables, and improve the efficiency and accuracy of the algorithm. The algorithm proposed is applied to six different systems and compared with classical algorithms, the results verify the effectiveness and superiority.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477121).

Key words: two-stage firefly algorithm; unit commitment; heuristic constraint adjustment

0 引言

机组组合(Unit Commitment, UC)是电力系统一个经典的问题, 其目的是在某段调度周期内和一定的约束条件下, 合理安排机组的启停状态和机组出力, 使总的发电费用最低。机组组合问题的求解是电力系统解决优化潮流、经济调度进而实现自动发电控制、自动电压控制的前提, 对此问题的研究有很重要的实际意义, 一直以来都是学术界和工业界研究的重点^[1-2]。

机组组合是一个高维、非凸、非线性的混合整数规划问题, 在数学上是一个 NP-hard 问题。随着

系统规模的增大, 在有限的时间内获得精确可行解是一大难题, 至今没有一个统一的高效解决方法。很多数学优化方法均已应用到这一问题的求解, 包括局部寻优法^[3]、优先顺序法^[4]、动态规划法^[5]、混合整数规划法^[6]、拉格朗日松弛法^[7]等解析类方法以及系统进化算法^[8]、遗传算法^[9]、粒子群算法^[10]、蚁群算法^[11]、量子进化算法^[12]等智能优化类算法。局部寻优法和优先顺序法计算速度快, 所需内存少, 但往往找不到最优解; 动态规划是一种被广泛使用的机组组合算法, 但随着机组数量和调度时间的增加, 容易引起“维数灾”, 难以考虑与时间有关的约束以及爬坡约束等; 混合整数规划直接用于实际问题中时效率低, 必须把问题进行有效分解; 拉格朗日松弛法在求解过程中对迭代中的振荡、可行解的获取、收敛条件等问题不能做到鲁棒处理^[13]。智能

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51477121); 国家科技支撑计划项目(2015BAA01B01)

优化类方法具有对目标函数性态没有特殊要求,从理论上来说可以找到全局最优解,可以得到多个可选方案,方法比较灵活,可以考虑多种约束,适合于并行处理等优点,是近年来机组组合领域研究的热点^[14]。但是,智能优化方法本质上都属于无约束优化算法,如何处理约束将很大程度上影响算法效率,机组组合中离散的启停约束处理显得尤为重要,也是研究的重点。

针对上述问题,本文提出一种基于搜索+调整的两阶段萤火虫算法求解机组组合问题。使用一种新颖的萤火虫算法作为搜索引擎,将 UC 问题的求解流程分解为离散启停优化及连续的经济调度两个子问题,使用离散萤火虫算法求解离散主问题,改进实数萤火虫算法求解经济调度子问题,二者交替迭代。主问题中提出启发式策略处理离散启停约束,子问题中使用罚函数处理爬坡等约束并且提出个体变异和参数自适应调整的改进策略,提高算法全局搜索能力和收敛速度,仿真验证了算法的有效性。

1 机组组合模型

本文所考虑的机组组合模型,目标函数是发电费用和机组启动费用最小,考虑系统平衡、旋转备用、机组调节能力、机组爬坡、机组最小启/停时间约束。

$$\text{Obj } \min F(P,U) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (f(P_i^t)U_i^t + C_i U_i^t (1 - U_i^{t-1}))$$

$$f(P_i) = a_i + b_i \times P_i + c_i \times P_i^2$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \textcircled{1} \sum_{i=1}^N P_i^t U_i^t = P_D^t \\ \textcircled{2} \sum_{i=1}^N U_i^t P_{i,\max} \geq P_D^t + S_D^t \\ \textcircled{3} P_{i,\min} U_i^t \leq P_i^t \leq P_{i,\max} U_i^t \\ \textcircled{4} R_i^{\text{Down}} \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq R_i^{\text{Up}} \\ \textcircled{5} [T_i^{\text{on}}(t-1) - T_i^{\text{on}}](U_i^{t-1} - U_i^t) \geq 0 \\ \textcircled{6} [T_i^{\text{off}}(t-1) - T_i^{\text{off}}](U_i^t - U_i^{t-1}) \geq 0 \end{cases} \quad t \in (1, 2, \dots, T)$$

(1)

模型中: N 表示机组数目; T 表示调度周期; P_i^t, U_i^t 分别表示第 i 号机组第 t 时段的出力及启停情况, $U = 0$ 表示机组关停, $U = 1$ 表示机组开启; C_i 表示机组 i 的启动费用系数; a_i, b_i, c_i 是机组 i 的发电费用系数; P_D^t, S_D^t 分别表示 t 时段系统的负荷及旋转备用需求; $P_{i,\max}, P_{i,\min}$ 及 $R_i^{\text{Up}}, R_i^{\text{Down}}$ 分别表示第 i 号机组的最大、最小技术出力和向上、向下爬坡能力; $T_i^{\text{on}}, T_i^{\text{off}}$ 分别表示第 i 号机组的最少开启、

关停时间。

2 萤火虫算法原理及其改进

萤火虫算法(Firefly algorithm)是一种新的自然启发式算法,其灵感来自萤火虫的社会行为。萤火虫是自然界中最特殊、迷人的生物之一。自然界中大约有 2 000 个种类,大多数萤火虫能发出短暂、有节奏的荧光,大部分萤火虫的荧光是吸引其他萤火虫的信号机制。通过将萤火虫荧光的部分特性进行理想化抽象,剑桥大学的 Dr. Yang 发明了萤火虫算法^[15-16]。

基本萤火虫算法如下。

1) 吸引度

在萤火虫算法中,吸引度函数的主要形式可以是任意的单调递减函数,通常为

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad m \geq 1 \quad (2)$$

式中: r 是两萤火虫之间的距离; β_0 是初始吸引度; γ 是吸收系数; m 通常取 2。

2) 萤火虫之间的距离

两萤火虫 p 和 q 在分别位置 x_p 和 x_q , 两者间的距离可以定义为笛卡尔或者欧式距离。

$$r_{pq} = \|x_p - x_q\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{p,s} - x_{q,s})^2} \quad (3)$$

式中: $x_{p,s}$ 是第 p 只萤火虫的第 s 维空间坐标; d 是总共的坐标维度; $q \in \{1, 2, \dots, F_n\}$ 。虽然 q 是随机选择的,但是不等于 p , F_n 表示总的萤火虫数目。对于其他的应用,如调度安排,距离可以是任何合适的形式,不局限于笛卡尔距离。

3) 萤火虫移动

当萤火虫 p 被另一只更有吸引力(更亮)的萤火虫 q 吸引时,其将发生移动。

$$x_p' = x_p + \beta(r) \times (x_p - x_q) + \alpha(\text{rand} - \frac{1}{2}) \quad (4)$$

式中的第 2 部分由萤火虫之间的吸引决定,第 3 部分引入了随机参数 ' α ', " rand " 是 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

3 二进制+实数编码萤火虫算法求解 UC 问题

3.1 二进制编码萤火虫算法解机组组合问题

3.1.1 编码方法

在 UC 问题中,二进制数据“1”和“0”用来指示机组的转态(开或停)。Dr. Yang 提出的萤火虫算法是实数编码,因此为了处理二进制优化问题需要做一些改进。本文提出的算法,相关的连续变量通过概率性变化的阈值控制转换为 1 或 0。在二进制

萤火虫算法中, x_p 和 x_q 取值 0 或者 1 则两者之差将在 $(-1, 1)$ 之间变化。当 r 值在 -1 到 1 之间变化时, 则式(2)中 β 的取值在 $0.3679 \sim 2.7183$ 之间变化, 进而依据式(4) x'_p 将在 -2.2180 到 4.2180 之间变化。若由 0 和 1 表示机组的启停状态, 需要固定一个阈值。如果 x'_p 大于阈值, 则该个体更有可能选择为“1”反之则选择为“0”。阈值水平可以从 0 到 1 变化, 为了增强二进制萤火虫的表现, 采用改进的阈值函数(图 1) \tanh 为

$$f(x'_p) = \tanh(|x'_p|) = \frac{\exp(2 \cdot |x'_p|) - 1}{\exp(2 \cdot |x'_p|) + 1} \quad (5)$$

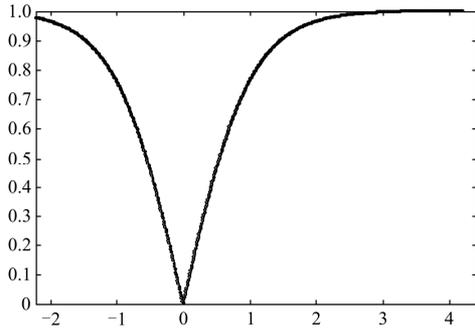


图 1 阈值函数示意图

Fig. 1 Threshold function schematic diagram

产生一个 0 到 1 之间的随机数, 用 0 或者 1 表示机组的状态, 当 $f(x'_p)$ 大于 $\text{rand}(0, 1)$, 机组状态为 1 否则为 0。

3.1.2 约束调整策略

当随机产生初始解或者萤火虫进行了位置的更新后, 萤火虫可能不满足 $T^{\text{on}}/T^{\text{off}}$ 约束, 备用约束等。求解机组组合问题的难点就是系统备用和最小开停机时间约束条件的处理, 一般的惩罚函数法虽概念简单, 实施方便, 但在 01 离散问题中惩罚系数的确定却非常困难, 且当惩罚系数过大时可能导致惩罚函数值在可行域的边界附近呈现病态^[17]。本文采用如下启发式策略进行约束修复:

1) 若旋转备用约束不满足, 则处于关停状态的经济性较好机组识别出来并依次启动, 直到备用约束满足, 其中机组的经济性优先顺序按照平均煤耗确定, 平均煤耗按式(6)确定。

$$AvP_i = \frac{\int_{P_{i,\min}}^{P_{i,\max}} f(P_i) dP_i}{P_{i,\max} - P_{i,\min}} \quad (6)$$

2) 若旋转备用约束满足, 则在调度周期内的每一段间隔都要检查最小启/停约束, 一旦最小启停时间约束不再满足, 则启用启停修复机制修补偏差。

例如, 对某个机组而言, 假设 T^{on} 是 5, T^{off} 是 4, 调度周期为 12 h, 如果机组 1 实际的关停时间是 3 h, (第 5 h 到第 7 h), 则其违反了 T^{off} 约束。在此例中, 该机组在第 5 h 之前或第 7 h 之后的状态可调整为“0”, 如图 2 所示。

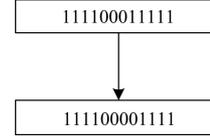


图 2 修复停机时间约束示意图

Fig. 2 Schematic diagram of repairing off-time constraints

通过这些改变, 如果该机组违反了 T^{on} 约束, 则该机组的在违反约束时段的状态变为“1”, 如图 3 所示。

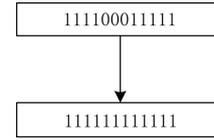


图 3 修复开机时间约束示意图

Fig. 3 Schematic diagram of repairing on-time constraints

3.2 改进实数编码萤火虫算法实现负荷经济分配

一旦机组的最小启/停时间约束得到满足, 则可以用改进的实数编码萤火虫算法求解机组当前开停状态下的经济调度问题, 约束使用罚函数处理。

3.2.1 个体变异机制

假设 $X_{\text{Best}}^{\text{Iter}}$, $X_{\text{Worst}}^{\text{Iter}}$ 分别是当前迭代中的最优及最差个体, 随机从当前种群中选择 3 个萤火虫个体 $X_{q_1}, X_{q_2}, X_{q_3}$, $q_1 \neq q_2 \neq q_3$ 。通过差分变异得到两个新个体:

$$X_{\text{Mute}1} = X_{q_1} + \Delta \times (X_{q_2} - X_{q_3}) \quad (7)$$

$$X_{\text{Mute}2} = X_{\text{Mute}1} + \Delta \times (X_{\text{Best}}^{\text{Iter}} - X_{\text{Best}}^{\text{Iter}})$$

式中, Δ 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。使用上式中的变异个体, 产生下述 5 个新个体:

$$X_{\text{Best},1} = [x_{\text{Best},1}, x_{\text{Best},2}, \dots, x_{\text{Best},D}] \quad (8)$$

$$x_{\text{Im}p1,j} = \begin{cases} x_{\text{Mute}1,j}, & \text{if } \kappa_1 \leq \kappa_2 \\ x_{\text{Best}1,j}, & \text{if } \kappa_1 > \kappa_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{\text{Im}p2,j} = \begin{cases} x_{\text{Mute}1,j}, & \text{if } \kappa_3 \leq \kappa_2 \\ x_j, & \text{if } \kappa_3 > \kappa_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$x_{\text{Im}p3,j} = \begin{cases} x_{\text{Best},j}, & \text{if } \kappa_4 \leq \kappa_3 \\ x_j, & \text{if } \kappa_4 > \kappa_3 \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{\text{Im}p4,j} = \begin{cases} x_{\text{Mute}1,j}, & \text{if } \kappa_5 \leq \kappa_4 \\ x_{\text{Mute}2,j}, & \text{if } \kappa_5 > \kappa_4 \end{cases} \quad (12)$$

$$X_{Im p5} = \psi \times X_{Worst} + \zeta \times (X_{Best} - X_{Worst}) \quad (13)$$

式中： $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5, \psi$ 和 ζ 是[0, 1]之间的随机数。分别计算 5 个新个体的目标函数，若其中最小目标函数小于第 i 个萤火虫的目标函数值，则用其替代第 i 个萤火虫的位置。

3.2.2 参数自适应调整

基本萤火虫算法中的参数 α ，控制算法在对邻域萤火虫位置未知时进行随机搜索。 α 的大小控制着随机搜索的范围，较大的 α 值导致在大范围全局搜索，较小的 α 则进行局部搜索。因此，合适的 α 值设定将平衡算法在全局和局部搜索上的表现。因此，提出一种随迭代自适应调整的 α 值控制方式。

$$\alpha^{Iter+1} = \left(\frac{1}{2k_{max}}\right)^{1/k_{max}} \alpha^{Iter} \quad (14)$$

式中： $Iter, k_{max}$ 分别是当前迭代次数和最大迭代次数； α 初值在[0, 1]之间，随着迭代次数增大， α 逐渐减小。控制算法在初始阶段有较强的全局搜索能力，在迭代后期则有较强的局部搜索能力，加快收敛速度。

3.3 算法详细步骤

至此，两阶段萤火虫算法的具体步骤如下。

步骤 1：初始化参数。包括机组数目 N ，各机组的费用系数，调度周期 H ，及调度周期内 1 h 为间隔各点负荷数据，标记迭代次数 $cc=1$ 。

步骤 2：离散编码种群的连续实数矩阵初始化。种群规模 F_n ，每个解 X 有 D 维， D 代表待优化变

量数目，本文模型中 $D = N \cdot H$ 。 X 的每一位均在 -2.2180 到 4.2180 之间随机初始化。

步骤 3：实数矩阵映射为二进制编码。利用式 (6) 的阈值判断将步骤 2 中的实数矩阵映射为二进制编码的初始解，一个二进制种群的结构如图 4 所示。

	时段1	时段2	...	时段T
	机组1,2...,N			
X1	100 ... 01	101 ... 01	...	110 ... 10
X2	101 ... 11	110 ... 01	...	111 ... 01
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X30	111 ... 00	101 ... 11	...	101 ... 11

图 4 种群初始化结构示意图

Fig. 4 Population initialization structure diagram

步骤 4：按照 3.1.2 节的约束校核与修复策略对种群编码进行调整，生成新的满足备用和启停约束的新种群。

步骤 5：按照 3.2 节的改进连续编码的萤火虫算法进行当前机组组合的经济调度求解。

步骤 6：计算适应度值。机组出力为步骤 4 中经济调度的结果。

步骤 7：评价种群所有萤火虫，计算两两之间的吸引力及距离。

步骤 8：按照式(3)更新萤火虫位置， $cc=cc+1$ ，转 3)。

步骤 9：停机准则，达到设置的最大迭代次数。算法整体流程如图 5 所示。

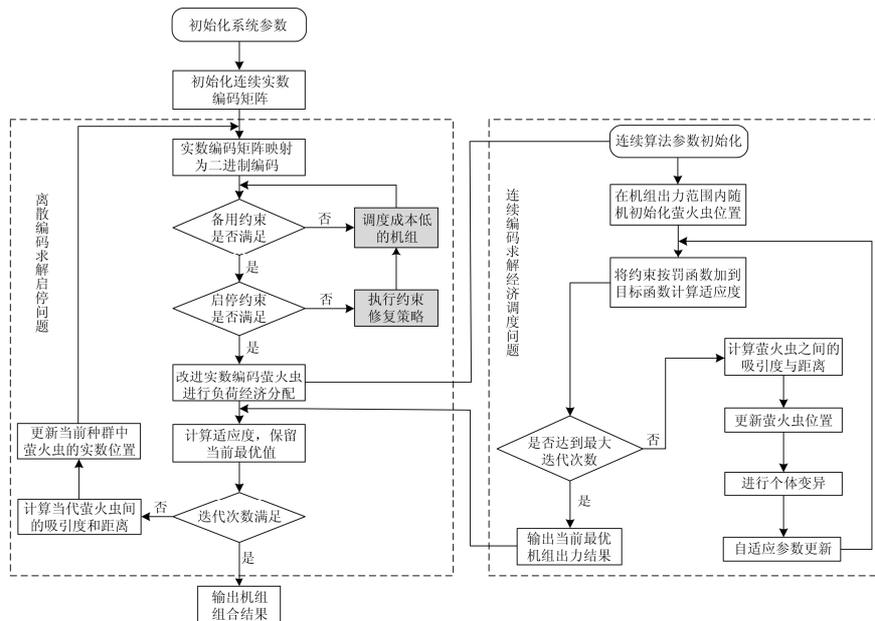


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the algorithm

4 算例分析

为验证本文算法的有效性, 分别针对 10 机、20 机、40 机、80 机和 100 机算例系统进行求解, 其中 10 机系统参数取自文献[18], 其余算例数据为 10 机系统复制而来。

算法中, 离散和连续萤火虫的种群规模均为 30, 最大迭代次数 1 000, 初始吸引度 β_0 取 1, 荧光吸收系数 γ 取 0.2, 随机参数 α_0 的初值取 0.5。

仿真环境: CPU Intel(R)Core(TM) i3-2310M @2.10G Hz, windows 7 64 位, Matab 8.1.0。

4.1 经典 10 机系统仿真结果

首先, 将本文算法与未进行改进的萤火虫算法应用到 10 机系统, 两者的收敛曲线如图 6 所示。标准萤火虫算法得到最优成本 78 863.4 t 标煤, 迭代到 234 代才收敛, 改进的萤火虫算法得到最优成本 78 625.6 t 标煤, 迭代 57 代即收敛。可见本文提出的变异策略和自适应参数调整的改进策略能够加强算法的全局搜索能力和收敛速度。

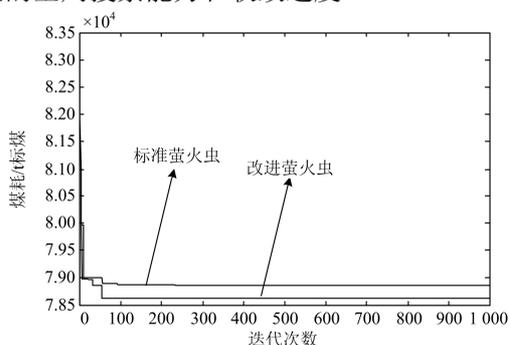


图 6 10 机系统的算法收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of 10 units system

同时应用拉格朗日松弛法^[18]、系统进化算法^[8]、启发式粒子群^[19]、遗传算法^[20]、标准粒子群、改进离散粒子群^[21]、改进双重粒子群^[2]、蚁群粒子群混合^[11]、自学习策略粒子群^[22]等多种现有文献中的算法进行求解, 均进行 30 次独立试验, 取最好结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 在现有的这些算法中, 本文提出的两阶段萤火虫算法找到的机组组合成本最低, 表明了本文方法极好的搜索能力。同时, 在时耗上仅

次于改进的离散粒子群算法, 表明本文方法在具有极强搜索能力的同时保证了算法的较小时耗。

表 1 10 机系统不同算法结果

Table 1 10 units system results comparison among different algorithms

算法	煤耗成本/t 标煤	耗时/s
拉格朗日松弛	81 245.5	13.5
系统进化算法	79 035	41.2
HPSO	81 118.3	33.2
GA	79 807.0	23.6
PSO	79 561	21.3
改进 DPSO	78 967.9	9.5
改进双重 PSO	79 665.8	14.3
蚁群粒子群混合算法	79 010.1	19.6
自学习策略 PSO	78 965	26.5
两阶段编码标准萤火虫	78 863.4	18.4
本文算法	78 625.6	13.2

4.2 多机系统仿真结果

将初始 10 机数据进行复制得到 20、40、60、80、100 机系统, 分别应用本文算法进行机组组合求解。由表 2 可知, 随着系统规模的增大, 煤耗和时耗均在增加, 但从增长率来看, 随着机组规模的增加, 煤耗增长略微大于机组增长倍数, 但时耗增长小于机组增长倍数。表明, 随着机组规模的增加, 寻优空间增大, 算法的搜索能力有一定的降低, 但是算法收敛速度依然迅速, 但总体来讲时间的增长近似线性, 如图 7 所示, 避免了维数灾难引起的指数级增长, 充分表明了算法的有效性。

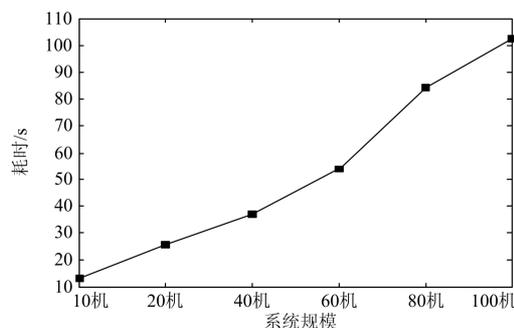


图 7 时耗与系统规模的关系示意图

Fig. 7 Diagram of the relationship between time consumption and system scale

表 2 多机系统算法的表现

Table 2 Algorithm performance of multi-units systems

系统规模	10 机	20 机	40 机	60 机	80 机	100 机
煤耗	78 525.6	157 253.4	314 705.8	473 066.9	629 743.4	786 104
增长率		100.3%	300.8%	502.4%	702%	901.1%
时耗	13.2	25.5	37	54	84.3	102.5
增长率		93.2%	180.3%	309.1%	538.6%	676.5%

5 结论

针对机组组合问题, 本文提出了一种基于搜索+调整的两阶段萤火虫算法。用离散萤火虫算法求解启停问题, 用改进的连续萤火虫算法求解经济调度问题, 二者交替迭代求解。迭代中, 离散的启停相关约束通过科学的启发式调整规则进行调整, 连续的爬坡等约束利用罚函数进行处理, 保证了解的可行性, 通过个体变异和参数自适应调整两项改进提高了算法的收敛速度和全局搜索能力。在10~100机的6个算例中, 验证了本文算法的有效性和优越性。

参考文献

- [1] 程世军, 孟杰, 王晓晖, 等. 风电-储能联合日运行优化调度模型[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 68-72, 80.
CHENG Shijun, MENG Jie, WANG Xiaohui, et al. A joint daily operational optimization model for wind power and energy storage devices[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 68-72, 80.
- [2] 李整, 谭文, 秦金磊. 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 189-195.
LI Zheng, TAN Wen, QIN Jinlei. An improved dual particle swarm optimization algorithm for unit commitment problem[J]. Proceedings of CSEE, 2012, 32(25): 189-195.
- [3] HAPP H H, JOHNSON R C, WRIGHT W J. Large scale hydro-thermal unit commitment method and results[J]. IEEE Transactions on PAS, 1971, 90(3).
- [4] FAN J Y, ZHANG L, MCDONALD J D. Enhanced techniques on sequential unit commitment with interchange transactions[J]. IEEE Transactions on PWRS, 1996, 11(1).
- [5] PARK J H, KIM S K, PARK G P, et al. Modified dynamic programming based unit commitment technique[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 25-29 July, 2010: 1-7.
- [6] 杨佳俊, 雷宇, 龙淼, 等. 考虑风电和负荷不确定性的机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 63-70.
YANG Jiajun, LEI Yu, LONG Miao, et al. Study of unit commitment considering the uncertainty of wind farm and load[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 63-70.
- [7] 葛晓琳, 张粒子. 考虑调峰约束的风水火随机机组组合问题[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 222-230.
GE Xiaolin, ZHANG Lizi. Wind-hydro-thermal stochastic unit commitment problem considering the peak regulation constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 222-230.
- [8] 陈皓勇, 张靠社, 王锡凡. 电力系统机组组合问题的系统进化算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 9-13.
CHEN Haoyong, ZHANG Kaoshe, WANG Xifan. Evolutionary optimization method of power system unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 9-13.
- [9] 张杰, 刘晓明, 孙东磊, 等. 基于混合遗传算法的电力系统源网协同调度[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 20-25, 32.
ZHANG Jie, LIU Xiaoming, SUN Donglei, et al. Synergistic dispatch of power source and electric network in power system based on hybrid genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 20-25, 32.
- [10] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [11] 陈焯, 赵国波, 刘俊勇, 等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 52-56.
CHEN Ye, ZHAO Guobo, LIU Junyong, et al. An ant colony optimization and particle swarm optimization hybrid algorithm for unit commitment based on operate coding[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 52-56.
- [12] 吉鹏, 周建中, 张睿, 等. 改进量子进化混合优化算法在溪洛渡电站机组组合中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 84-91.
JI Peng, ZHOU Jianzhong, ZHANG Rui, et al. Study of unit commitment in Xiluodu based on a hybrid optimization algorithm of improved quantum evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 84-91.
- [13] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51-56.
CHEN Haoyong, WANG Xifan. Unit commitment optimization methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(4): 51-56.
- [14] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 51-56.
CHEN Haoyong, WANG Xifan. Unit commitment optimization methods[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 1999, 23(5): 51-56.
- [15] YANG Xinshe. Nature-inspired meta heuristic algorithms[M]. UK: Lunvier Press, 2008.
- [16] YANG X S. Firefly algorithm stochastic test functions and design optimization[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2010, 2(2): 78-84.
- [17] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 45-52.
- WU Xiaoshan, ZHANG Buhuan, YUAN Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 45-52.
- [18] 韩学山, 柳焯. 考虑发电机组输出功率速度限制的最优机组组合[J]. 电网技术, 1994, 18(6): 11-16.
- HAN Xueshan, LIU Zhuo. Optimal unit commitment consider unit's ramp rate limits[J]. Power System Technology, 1994, 18(6): 11-16.
- [19] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 28-32.
- HU Jiasheng, GUO Chuangxin, CAO Yijia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 28-32.
- [20] 蔡超豪, 蔡元宇. 机组优化组合的遗传算法[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 44-47, 51.
- CAI Chaohao, CAI Yuanyu. Optimization of unit commitment by genetic algorithm[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 44-47, 51.
- [21] 娄素华, 余欣梅, 熊信良, 等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 30-35.
- LOU Suhua, YU Xinmei, XIONG Xinyin, et al. Unit commitment using improved discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 30-35.
- [22] 陈海良, 郭瑞鹏. 基于改进离散粒子群算法的电力系统机组组合问题[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 94-99.
- CHEN Hailiang, GUO Ruipeng. Unit commitment based on improved discrete particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 94-99.

收稿日期: 2015-12-07; 修回日期: 2016-01-13

作者简介:

方必武(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统经济调度与负荷调度; E-mail: bwfwhu@163.com

王波(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为源荷协调及智慧能源。

(编辑 葛艳娜)